

基于 ASTER 立体数据和 ICESat/GLAS 测高数据融合高精度提取南极地区地形信息

鄂栋臣^①, 沈强^{②*}, 徐莹^①, Gang Chen^③

① 武汉大学中国南极测绘研究中心, 极地测绘科学国家测绘局重点实验室, 武汉 430079

② 中国地震局地震研究所, 武汉 430071

③ Department of Geography, University of Calgary, Calgary, Alberta T2N 1N4, Canada

* E-mail: c1980606@hotmail.com

收稿日期: 2008-02-18; 接受日期: 2008-08-04

国家自然科学基金(批准号: 40606002)和国家测绘局南极考察地区基础测绘项目(编号: 146990711109-1)资助

摘要 为了更好地保证从中山站到 Dome A 的南极内陆冰盖考察, 该考察路线沿线的地形信息是必需的. 虽然 Radarsat 南极制图计划(RAMP)能提供迄今为止最高精度的全南极数字高程模型(DEM), 其最高水平分辨率为 200 m, 但其真正的水平分辨率根据源数据的比例尺和区域覆盖密度不同而不同. 对于冰架和内陆冰盖地区, 水平精度约为 5 km. 在东南极内陆冰盖地区和远离山脉地区该 DEM 的垂直精度估计为 ± 50 m, 因此更高精度的地形数据还不存在. 为了满足将来对地形信息更高精度的要求, 由于 ASTER 光学影像具有高的空间分辨率(15 m), 而 ICESat/GLAS 测高数据有较高的高程精度(13.8 cm), 因此本文融合 ASTER 立体数据和 ICESat/GLAS 测高数据提取了该考察路线高精度数字高程模型. 首先选择一些测高数据点作为 ASTER 提取 DEM 过程中的高程控制, 以减少匹配错误. 由于从 $75^{\circ}\sim 81^{\circ}\text{S}$ 范围没有合格的 ASTER 立体数据覆盖, 并且在该范围内 ICESat 轨道覆盖度大, 观测数据比较密集, 因此在该区域仅使用 ICESat 测高数据提取 DEM, 最后生成覆盖整条路线的 DEM. 分析结果表明 DEM 精度得到很大的提高, DEM 的绝对垂直精度某些地区优于 15 m, 除了影像 009-001 外, 其余所有结果精度都在 30 m 以内. 其内部精度优于 15 m, 某些情况下优于 7 m. 生成的结果达到 1:50000 制图标准. 结果表明在南极地区, 综合利用各种遥感数据提取南极地区冰面地形信息是一种经济有效的手段.

关键词

DEM
南极
中山站
Dome A
ASTER
ICESat
GLAS

中国第 21 次南极考察内陆冰盖考察队于 2005 年 1 月份顺利完成了从中山站到 Dome A 最高点的实地考察, 这是人类历史上第一次到达南极冰盖的最高点. 该考察路线是中国承担的国际横穿南极计划(International Trans Antarctic Scientific Expedition, ITASE)中的重要考察路线之一(图 1). 而此前, 中国进行过 4 次内陆冰盖考察, 但都未进入 Dome A 地区. 第一次内陆冰盖考察是在 1996/1997 年夏季由中国第

13 次南极科学考察队执行, 往内陆推进至距中山站 300 km 处. 接下来的两次内陆冰盖考察分别推进至距中山站 470 和 1108 km, 分别由第 14, 15 次南极科学考察队分别在 1997/1998 和 1998/1999 年完成. 第 4 次内陆冰盖考察仅推进至距中山站 164 km 处, 由第 18 次南极科学考察队执行, 是这几次考察中行程最短的一次(<http://www2.umaine.edu/itase/content/nationals/china.html>). 基于这些实地考察结果, 中国

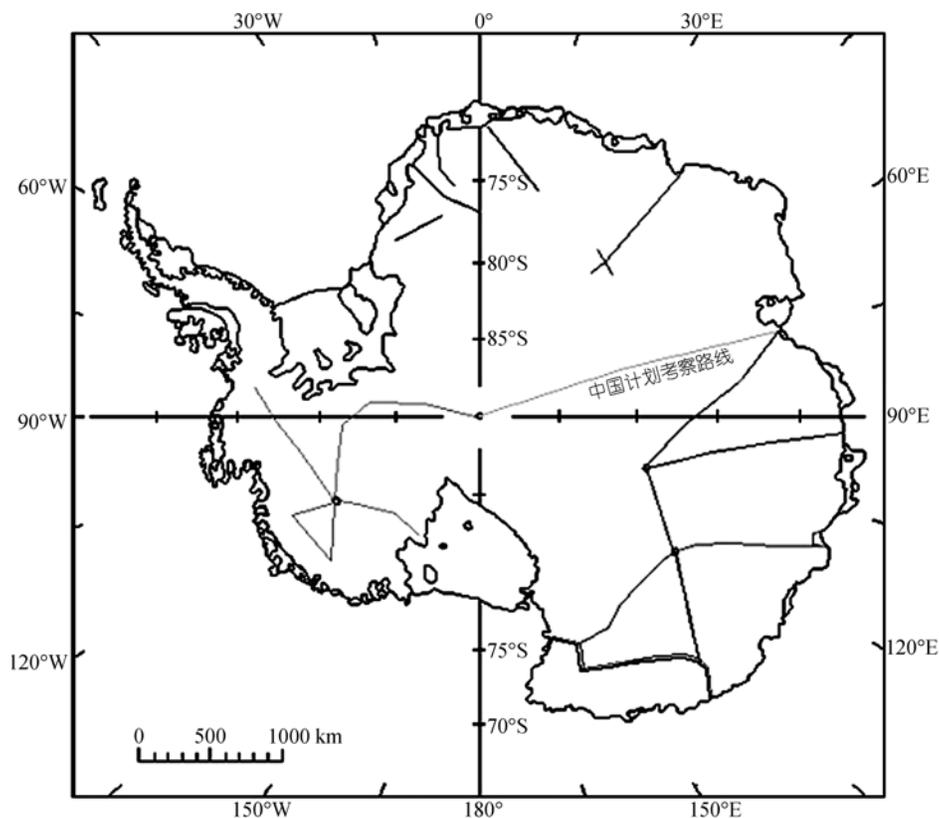


图1 横穿南极计划路线(来自 ITASE)

科学家已经在冰川学^[1,2], 气候学^[3,4]和全球变化^[5]等领域进行了大量研究工作. 这些研究成果将增进对南半球气候环境, 以及它与全球气候变化的关系的理解. 由于地形数据, 以及由地形数据衍生的地面坡度、坡向数据是所有涉及地理信息的科学研究重要基础数据. 而南极地区现存的地形数据主要有澳大利亚南极局制作的 1:1000000 全南极地形图、ERS-1 测高数据生成的 DEM(Digital Elevation Model)^[6]和 Radarsat 南极制图计划(RAMP: Radarsat Antarctic Mapping Project)使用 Radarsat SAR 提取的全南极 DEM^[7]. RAMP DEM 是至今为止最高分辨率的全南极数字高程模型, 其最高水平分辨率为 200 m. 但真实分辨率根据使用数据源精度不同而不同, 在冰架和内陆冰盖地区, 水平分辨率约为 5 km. 在东南极内陆地区和远离山脉地区的垂直精度为 ± 50 以内. 这种数据精度仅能满足 1:500000 比例尺制图要求^[8,9]. 为了满足将来对更多细节地形数据研究的要求, 本文试图融合 ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and

Reflection Radiometer)立体数据和 ICESat/GLAS(Ice, Cloud, and land Elevation Satellite/Geoscience Laser Altimeter System)测高数据来提取更高精度的地形信息. 在对 ASTER 立体影像提取 DEM 的过程中, 选择部分 GLAS 测高数据作为高程控制来减少匹配过程中的错误. 另外由于从 75°~81°S 没有合格的 ASTER 立体数据覆盖, 并且在该范围内 ICESat 轨道覆盖度大, 观测数据比较密集, 因此在该区域仅使用 ICESat 测高数据提取 DEM. 分析表明, 在加入高精度 GLAS 测高数据作为控制点后, ASTER 提取 DEM 的精度得到明显提高. 融合两种数据生成的 DEM 能满足 1:50000 比例尺的制图要求. 结果表明在南极地区, 综合利用各种遥感数据提取南极地区冰面地形信息是一种经济有效的手段.

1 ICESat/GLAS 和 ASTER 测量原理

ICESat 卫星平台上的唯一有效载荷地学雷达测高系统(GLAS)是第一颗卫星激光雷达测量仪器. 主

要目的是监测两极冰盖的物质平衡以及理解地球大气和气候的变化是如何影响极地冰盖物质平衡和全球海平面变化,同时ICESat观测全球格点的陆地高程、全球气溶胶和云的垂直分布情况.该卫星测高数据有 ± 13.8 cm的垂直精度,其地理定位精度优于 20 cm,激光光束在地面形成约 70 m直径的光斑^[10,11].ASTER影像在未进行几何精纠正的情况下,最好的地理定位和垂直精度分别优于 130 和 25 m^[12,13].GLAS测高数据的地理和垂直精度都大大优于 ASTER.然而,ICESat在赤道两条重复轨道之间存在 15 km的间距,即使在 80°S处重复轨道之间也存在 2.5 km间距^[14],这些条件限制了该数据提取DEM的分辨率,特别是在较低纬度地区.

搭载在EOS-AM1卫星平台上的ASTER传感器包括两独立的成像仪,分别指向天底方向和后视方向,两传感器之间呈 27.7°的夹角^[15].这种独立的配置使得能沿航迹近同时地获取同一地区的立体影像,这将大大提高在极端环境中两像对之间的相关性^[16].在提供合适的控制点信息,ASTER数据处理中心能提供最高绝对水平和垂直精度达 7 m的业务化DEM产品,在没有控制点信息的情况下最高垂直精度为 10 m^[16].但是在南极地区,DEM产品的精度受制于地表特征的单一性,极端恶劣环境和缺乏实测地面控制点信息等因素,ASTER数据处理中心未进行业务化生成DEM.考虑到ASTER立体数据具有更高的水平分辨率(15 m),其提取的DEM其水平分辨率也能优于 30 m,因此本文试图融合两种数据的优点,提高生成DEM的精度.

2 研究区域和数据源

1250 km长的南极内陆考察路线有复杂的地形特

征(沿途有大量的冰裂隙和雪坝)和多变的气候条件.在海岸线区域降水量能达到 500 mm,而在内陆地区降水量则不到 30 mm.研究区域经度覆盖范围从 76.00°E到 77.35°E,纬度范围从 69.37°S到 80.37°S.由于ASTER数据只覆盖 69.37°~75.00°S,其他区域将使用ICESat测高数据提取DEM,因为在高纬地区,ICESat轨道迅速收敛,使得该区域数据更加密集,因此可用来提取DEM.在本研究中,使用的ASTER L1A数据获取时间分别为 2000 和 2001 年,其中有 7 景影像具有相同的轨道号(轨道号: 5321)和相同的云层覆盖率(3%),数据获取时间为 2000 年 12 月 17 日 18:59 左右,影像获取时卫星处于升轨运行.另一景影像获取时间为 2001 年 11 月 6 日 04:11,轨道号为 9579,云层覆盖率为 4%,卫星处在降轨运行中.有关影像更详细的信息参见表 1.由于ASTER L1A层数据的头文件中包含了大量高精度地面控制点信息,但是由于这些地面控制点不包含高程信息,因此ICESat业务化高程数据集(GLA12)将引入模型来改善ASTER立体提取过程中的匹配结果,提高提取精度.版本号为 24的GLA12数据由 2A激光器获取,时间范围从 2003 年 9 月 25 日到 2003 年 11 月 18 日^[17].

3 数据融合和结果分析

除了影像 034-005(表 1)外,其余影像的太阳高度角都非常低(3°~6°),这种光照条件不能保证产生高质量的影像.另外,研究区域都为冰雪覆盖,将导致影像对比度非常低.地面特征单一降低了影像的质量.标准差是表示影像质量的一个参数之一,从表 1 最后 3 列可以得出,前 6 幅影像的对比度和信息量非常低,其灰度值动态范围小于 25 灰度级,标准差小于 2.0.影像 009-007 较其他 6 景影像有更高的动态

表 1 影像信息

影像代号	获取日期	太阳高度角/(°)	影像中心/(°)		影像信息(3N)		
			纬度	经度	最小	最大值	标准差
009-001	2000-12-17	6.299	-72.76468	79.24397	18.06	38.23	1.60
009-002	2000-12-17	5.813	-72.27875	78.46834	22.56	34.11	1.93
009-003	2000-12-17	5.315	-71.79011	77.73064	13.44	31.95	1.65
009-004	2000-12-17	4.574	-71.29911	77.02849	12.61	28.32	1.45
009-005	2000-12-17	4.041	-70.80581	76.35877	9.78	24.31	1.42
009-006	2000-12-17	3.597	-70.31048	75.71945	4.72	26.73	1.87
009-007	2000-12-17	3.152	-69.81331	75.10842	2.73	81.51	5.10
034-005	2000-11-06	20.648	-69.69618	75.27073	23.20	218.4	14.0

范围是因为该影像上有较多的云层, 影像 034-005 上有最高的动态范围和对比度是因为影像上存在海水特征。

在实际处理中, ERDAS LPS 软件包中的地球空间卫星影像处理软件被用来提取 ASTER DEM。由于影像质量较低, 默认的策略参数不能满足 ASTER 提取 DEM 的要求, 要得到满意的结果这些参数必须通过仔细调整, 需要调整的参数包括搜索窗大小、相关窗口大小、相关系数阈值大小和滤波函数等。由于无地面实测控制点, 而且影像上控制点位置也不易辨别, 因此使用卫星影像自带的卫星星历(卫星位置、速度)和姿态参数(omega, phi, kappa)来求解像对的方位元素。考虑到 GLAS 测高数据具有很好的垂直精度和定位精度, 这些数据输入到模型中, 来提高在提取 DEM 过程中影像匹配的成功率, 减少误匹配点。

GLA12 数据产品能从美国国家冰雪数据中心(NSIDC: National Snow and Ice Data Center)免费获得。GLA12 数据产品为二进制格式, 文件中除了包含高度和激光斑点位置信息外, 还包括测地学, 设备和大气改正参数。为了获得 ASCII 格式的高程点信息, 使用 NSIDC GLAS 测高信息提取工具(NGAT)进行提取, 提取信息为文本文件组织形式, 文件包括 4 列数据, 分别为纬度、经度、高程和大地水准面差距。该软件包在 IDL(Interactive Data Language, Boulder, USA)或者 IDL VM(Interactive Data Language Virtual Machine, Boulder, USA)环境中运行。此外, 由于所有的 ICESat/GLAS 高程数据都使用 TOPEX/Poseidon 参考椭球作为参考基准, 而 ASTER 影像是以 WGS-84 作为参考基准。因此, 必需首先把 TOPEX/Poseidon 参考系转换到 WGS-84 参考系。基于 IDL 参考椭球转换

工具, 自己开发了批处理程序进行数据参考信息的转换工作, 大大减少了人工交互, 提高了效率, 保证了数据处理的正确性。

表 2 给出了匹配的策略参数和结果的精度统计信息。除影像 009-001 外, 该影像获取的范围距离海岸线最远(表 2), 其余所有影像提取的 DEM 的均方根误差(RMSE)都小于 30 m。另外, 对比表 2 第 10 列结果, 除影像 009-006 和 009-007 外, ASTER 提取 DEM 与 GLA12 测高数据存在一定的偏差。高程平均值偏差随影像的海拔的升高变化范围从 0~40 m。除了影像 034-005 外, 其余 7 景影像具有相同的轨道号(轨道号: 5321)和卫星飞行方向(升轨), 且这些影像在很短的时间内获取的, 因此影像获取时卫星平台应具有相似的表现。DEM 存在偏差可能与每景影像的平均高程有关。回归分析表明平均高程偏差与每景影像的平均海拔高程之间存在三次函数的关系(图 2)。因为在模型解算中, 使用的是卫星星历来解求外方位元素, 引起提取结果均值存在偏差的原因可能受卫星星历精度有关。卫星位置, 速度和姿态的精度随着海拔的升高而降低。另一个原因可能是因两种数据集地理精度不同所导致, ASTER 精度为 130 m 左右, 而 GLA12 则优于 20 cm。在本研究中, 两种数据集的准确几何配准是无法实现的, 因为影像为冰雪覆盖, 地面特征不明显。前 7 景影像的高程均值与 GLAS 测高数据之间存在正的偏差, 而影像 034-005 则存在负的偏差, 这可能与卫星平台的飞行方向相关。

图 3~10 给出了 ASTER DEM 精度统计图, 其中横轴代表距离采样值。左纵轴代表 GLA12 测高数据和 ASTER DEM 在采样线上的高程, 右纵轴代表两种数据高程之差, 计算方法用 ASTER DEM 高程减去

表 2 策略参数和精度信息

影像代号	策略参数设置			一般统计信息/m			精度信息				
	搜索窗/像素	相关窗/像素	相关系数阈值	最小高程	最大高程	平均高程	最小/m	最大/m	平均误差/m	RMSEz/m	总点数
009-001	19×11	11×11	0.55	2590.5	2867.0	2744.2	30.8	47.1	40.0	40.0	85
009-002	15×15	11×11	0.50	2328.7	2677.2	2504.1	6.40	41.6	26.7	27.5	125
009-003	19×17	11×11	0.50	1995.0	2479.1	2251.2	-1.9	39.3	18.4	20.5	178
009-004	13×13	11×11	0.34	1782.7	2190.8	2001.1	-11.0	29.1	8.94	12.0	263
009-005	11×11	9×9	0.50	1493.6	1943.2	1741.6	-11.9	12.4	2.50	5.00	130
009-006	5×3	3×3	0.58	771.9	1587.7	1295.5	-42.0	22.5	-0.72	11.9	64
009-007	9×7	3×3	0.60	12.3	1055.1	528.0	-34.1	32.8	0.00	15.0	49
034-005	21×3	7×7	0.80	3.9	913.7	119.5	-40.0	66.7	-7.40	13.4	391

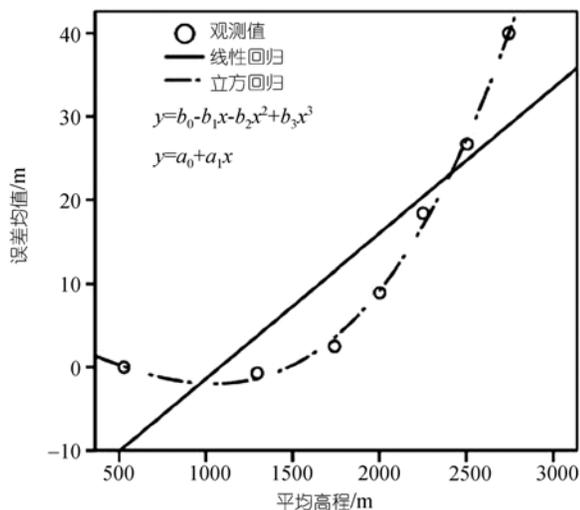


图 2 均值误差与平均海拔回归分析

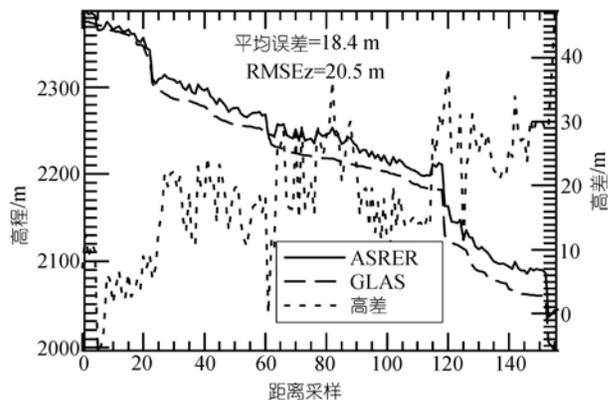


图 5 009-003 的高程对比

采样间隔为 1.3 km

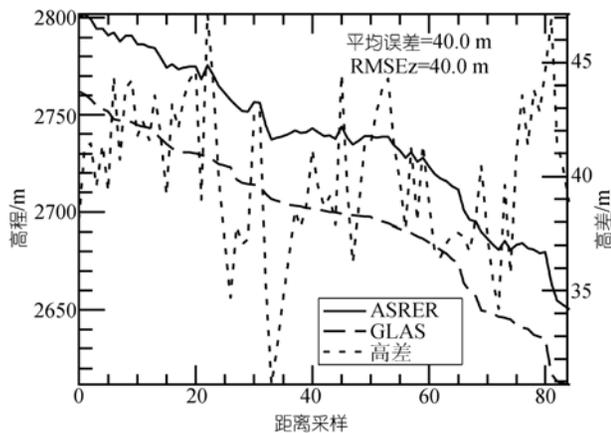


图 3 009-001 的高程对比

采样间隔为 1.3 km

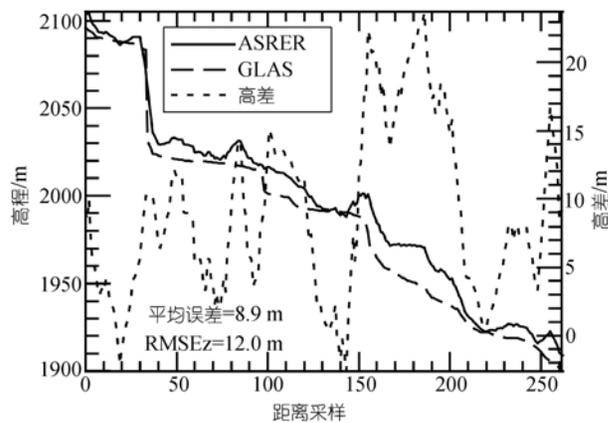


图 6 009-004 的高程对比

采样间隔为 500 m

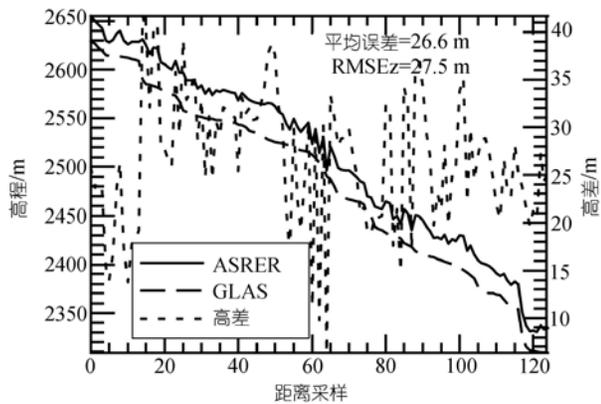


图 4 009-002 的高程对比

采样间隔为 1.3 km

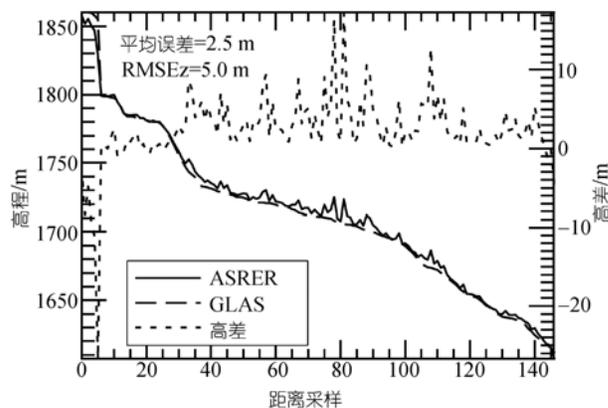


图 7 009-005 的高程对比

采样间隔为 340 m

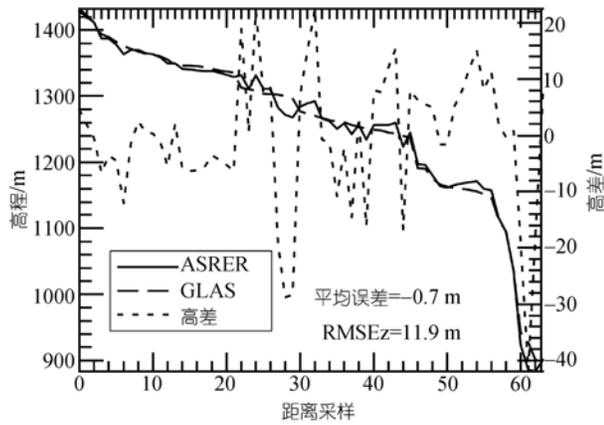


图 8 009-006 的高程对比

采样间隔为 340 m

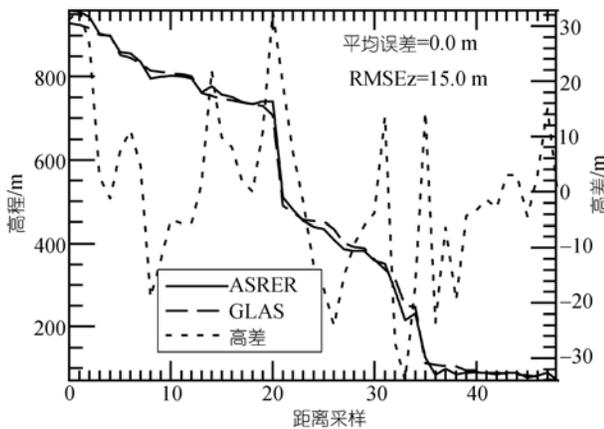


图 9 009-007 的高程对比

采样间隔为 340 m

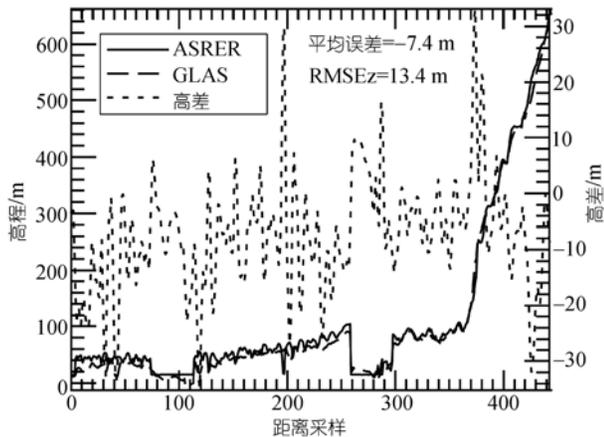


图 10 034-005 的高程对比

采样间隔为 170 m

GLA12 测高数据高程. 由于 GLA12 精度大大高于 ASTER DEM, 因此假定 GLA12 数据是精确的, 高差

的统计结果代表 ASTER DEM 的提取精度. 影像 009-004, 009-005, 009-006, 009-007, 034-005 提取的 DEM 均方根误差(RMSEz)都优于 15 m, 影像 009-002 和 009-003 提取的 DEM 精度优于 30 m, 影像 009-001 的精度则为 40 m. 从这些图可以看出, ASTER DEM 结果与 GLA12 测高数据具有很高的一致性. 即使在 没有实际地面控制点、极端环境和差的光照条件下, ASTER 提取的 DEM 的绝对垂直精度优于 40 m. 在大多情况下, 绝对垂直精度优于 30 m.

考虑到 ASTER DEM 与 GLA12 高程均值之间存在一定的偏差, 因此对 ASTER DEM 的内部精度也进行 评估, 代表 DEM 相对精度. 同样假设 GLA12 是精 确无误差. 图 11~18 给出了 ASTER DEM 内部精度 评定结果, 其中横轴代表距离采样, 左纵轴代表 GLA12 测高数据的高程梯度, 计算方法为沿采样线两相 邻点高程之差. 右纵轴代表 ASTER DEM 高程梯度 与 GLA12 测高数据高程梯度之差. 图中实线代表 GLA12 测高数据的高程梯度, 虚线代表两数据高 程梯度之差, 图中也给出了高程梯度之差的平均 值偏差和均方根误差. 结果显示影像 009-001, 009-002, 009-003, 009-004, 009-005, 034-005 提取的 DEM 内部精度都优于 7.6 m (~1/2 像素), 影像 009-006 和 009-007 优于 15 m (1 像素). 结果显示提取 的 DEM 具有很好的内部精度(相对精度), 精度的 提高主要由于增加了 GLA12 测高数据作为控制, 匹 配精度得到很大提高, 误差最大值也大大降低. 对比 以上结果, 平均高程存在偏差可能主要由于两种数 据的地理经度不同所致, 如果两种数据能精确的配 准,

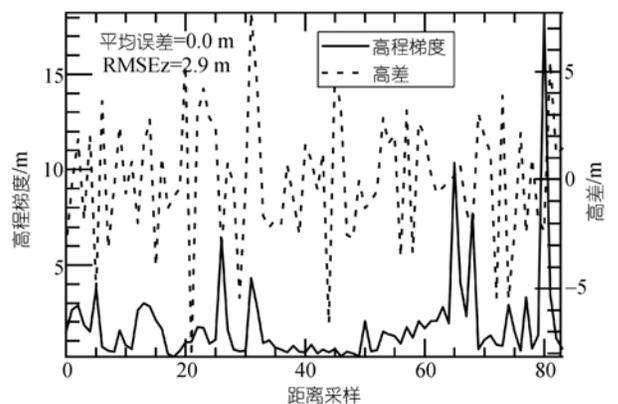


图 11 009-001 的高差对比

采样间隔为 1.3 km

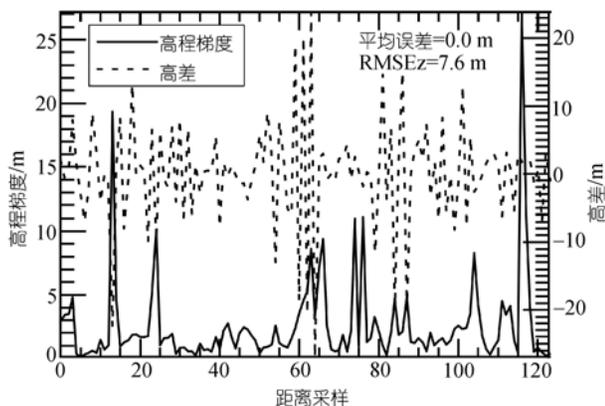


图 12 009-002 的高差对比

采样间隔为 1.3 km

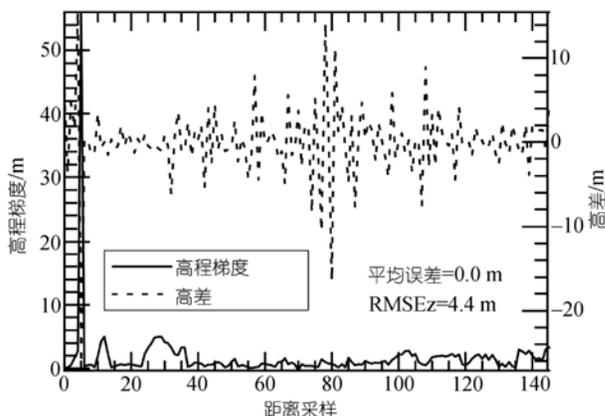


图 15 009-005 的高差对比

采样间隔为 340 m

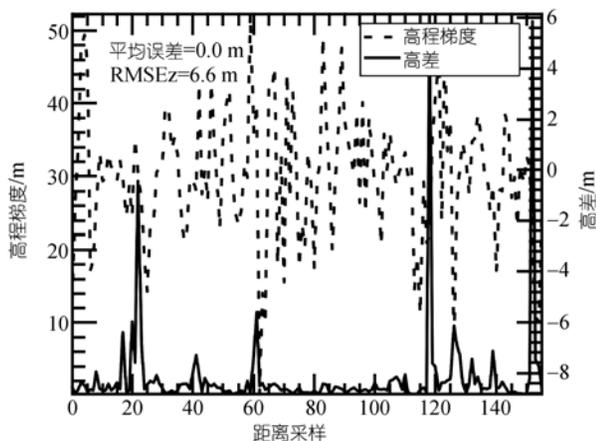


图 13 009-003 的高差对比

采样间隔为 1.3 km

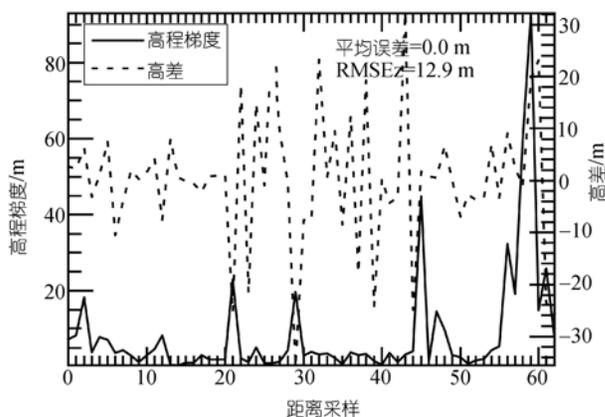


图 16 009-006 的高差对比

采样间隔为 340 m

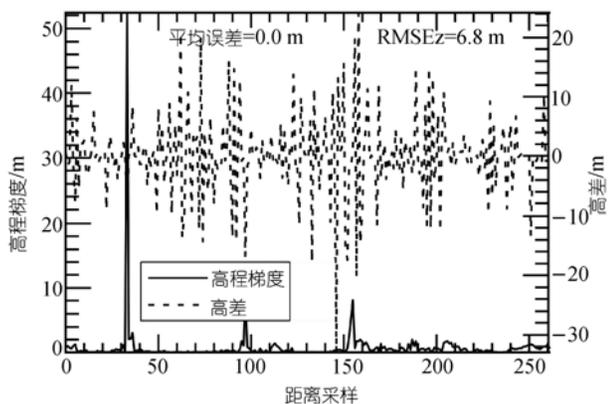


图 14 009-004 的高差对比

采样间隔为 500 m

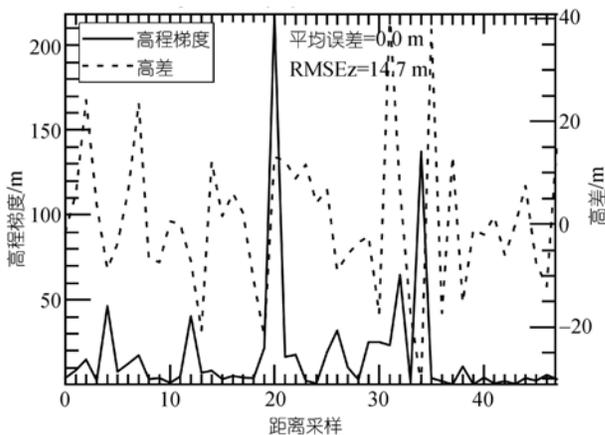


图 17 009-007 的高差对比

采样间隔为 340 m

其绝对垂直精度将进一步提高。

由于 75°~81°S 没有合格的 ASTER 立体数据覆盖, 该区域的 DEM 将仅使用 GLAS 测高数据来提取

DEM。图 19 给出了 GLA12 测高数据的轨道示意图。由于在低纬度地区轨道之间存在较大的空隙, GLA12

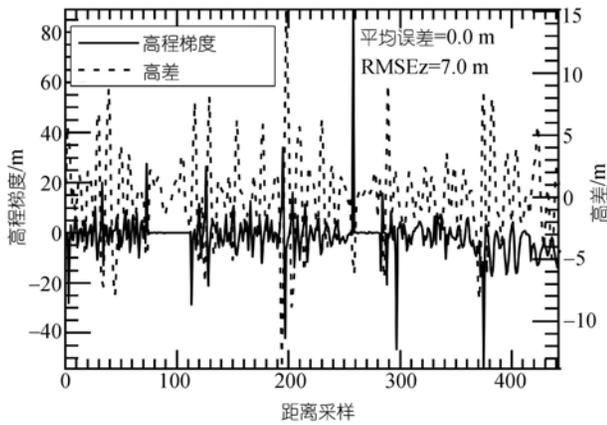


图 18 034-005 的高差对比
采样间隔为 170 m

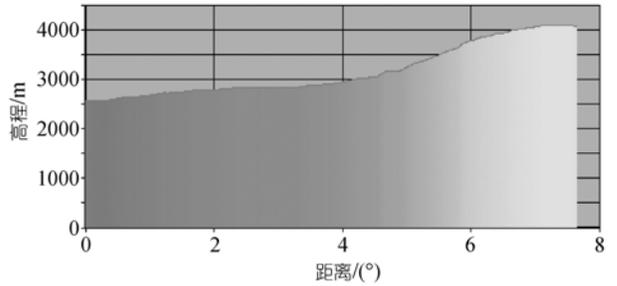


图 21 高程剖面线(对应图 20)
横坐标为考察路线所跨的纬度

变化范围从 2041.6~4092.4 m, 高程精度估计为 25 cm.

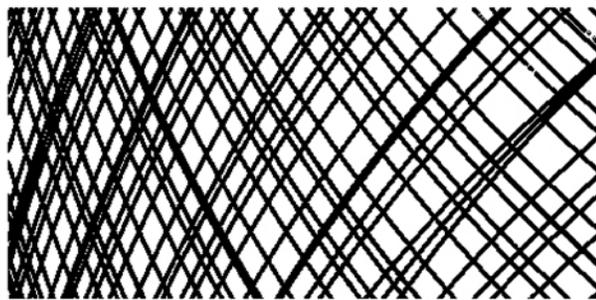


图 19 地面轨迹图



图 20 ICESat/GLAS 提取 DEM
空间分辨率为 1.1 km

提取的该区域 DEM 的空间分辨率为 1.1 km. 提取的 DEM 示意图见图 20. 图 21 给出了高程剖面线. 高程

4 结论

在本研究中, 融合了两种遥感数据来高精度提取中山站到 Dome A 考察路线的 DEM. 结果表明通过融合 ASTER 立体数据和 ICESat 测高数据能在很大程度上提高提取 DEM 的精度. 最终结果表明 DEM 的绝对精度优于 40 m, 内部精度(相对精度)优于 15 m, DEM 的分辨率在低纬度地区达到 30 m. 结果能满足 1:50000 比例尺地形图制图要求. 这将为科学考察和南极的科学研究提供更高精度的地形数据. 同时也说明, 在极地地区, 中等比例尺地形图完全可用遥感制图的方式实现, 特别是通过融合多种遥感数据, 地形图精度将进一步改善. 但是, 本研究也存在不足之处, 由于本文未使用地面控制点, 并且影像中也不易辨别控制点, 使得 ASTER DEM 的地理精度不能使用 GLA12 测高数据或其他控制点进行纠正和评估. 垂直精度评定过程中, 假定两数据集的地理精度为一致为前提的, 这种假定可能是导致高程均值间存在偏差的原因. 另外, 由于缺乏覆盖 75°~81°S 的 ASTER 立体数据, 仅使用 GLA12 数据提取的 DEM 有较低的水平分辨率(1.1 km).

致谢 感谢 NSIDC 中心提供的 ICESat/GLAS 测高数据的支持; 感谢评审人的建设性意见.

参考文献

- 1 任贾文, 效存德, 秦大河. Lambert 冰川流域物质平衡和南极冰盖变化. 自然科学进展, 2002, 12(10): 1064—1069
- 2 任贾文, Allison I, 效存德, 等. 东南极冰盖 Lambert 冰川流域的物质平衡研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32(2): 134—

- 3 Zhang M J, Xiao C D, Ren J W, et al. Climate and environmental features on both sides of the Lambert glacier basin. *Acta Geogr Sin*, 2004, 59(5): 709—715
- 4 Chen Z G, Bian L G, Xiao C D, et al. Characteristic of the seasonal variations of the near surface layer parameters on the Antarctic-ice sheet in Princess Elizabeth Land, East Antarctica. *Acta Geogr Sin*, 2006, 28(1): 35—41
- 5 张明军, 李忠勤, 秦大河, 等. 东南极洲 Lambert 冰川流域半个多世纪以来气候变化特征. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(1): 97—101
- 6 Bamber J L, Bindschadler R A. An improved elevation dataset for climate and ice-sheet modelling: validation with satellite imagery. *Ann Glaciol*, 1997, 25: 438—444
- 7 Liu H, Jezek K, Li B, et al. Radarsat Antarctic Mapping Project digital elevation model version 2. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. Digital media, 2001
- 8 马占宏, 马晓萍, 成燕辉, 等. 数字测绘产品质量要求第 1 部分: 数字线划地形图、数字高程模型质量要求(GB/T 1794.1-2000). 北京: 中国标准出版社, 2000
- 9 杜筱霞, 姜翔莺, 陈继良. 1:5000、1:10000 地形图航空摄影测量内业规范(GB/T 13990-1992). 北京: 中国标准出版社, 1992
- 10 Schutz B E. Laser footprint location (geolocation) and surface profiles Version 3.0. 2002
- 11 Geoscience Laser Altimeter System Science Team. Geoscience Laser Altimeter system. Science Requirements Version 2.01, 1997
- 12 Welch R, Jordan T, Lang H, et al. ASTER as a Source for Topographic Data in the Late 1990's. *IEEE Trans Geo Rem Sens*, 1998, 36(4): 1282—1289 [DOI](#)
- 13 Fujisada H, Bailey G B, Kelly G G, et al. ASTER DEM Performance. *IEEE Geo Sci Remote Sensing*, 2005, 43(12): 2707—2714 [DOI](#)
- 14 Brenner A C, Zwally H J, Bentley C R, et al. Derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights. Algorithm Theoretical Basis Document Version 4.1. 2003
- 15 Lang H, Welch R. ATBD-AST-08 Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER. Digital Elevation Models, Standard Product AST14 Report. 1999
- 16 Michael A, Simon H, Bhaskar R. ASTER User Handbook Version 2. 2001
- 17 Zwally H J, Schutz R, Bentley C, et al. GLAS/ICESat L2 Antarctic and Greenland Ice Sheet Altimetry Data V001, Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. Digital media, 2003